

Розглянуто можливості використання гібридних електростанцій на базі поновлюваних джерел електроенергії. Проаналізовано обмінні потоки енергії між різнотипними джерелами електроенергії. Побудовані залежності обмінної потужності від основних параметрів електричного сигналу. Визначено точки мінімуму обмінної потужності між генераторами, що дозволило зробити висновки про оптимальні режими роботи генераторів з різною природою генерації незалежно від внутрішньої будови і принципу їх дії

Ключові слова: електромагнітна сумісність генераторів, поновлювані джерела електроенергії, неактивна потужність Фризе, обмінні процеси, обмінна потужність

Рассмотрены возможности использования гибридных электростанций на базе возобновляемых источников электроэнергии. Проанализированы обменные потоки энергии между разнотипными источниками электроэнергии. Построены зависимости обменной мощности от основных параметров электрического сигнала. Определены точки минимума обменной мощности между генераторами, что позволило сделать выводы об оптимальных режимах работы генераторов с разной природой генерации независимо от внутреннего строения и принципа их действия

Ключевые слова: электромагнитная совместимость генераторов, возобновляемые источники электроэнергии, неактивная мощность Фризе, обменные процессы, обменная мощность

УДК 621.1

DOI: 10.15587/1729-4061.2016.74954

АНАЛІЗ ОБМІННИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ПАРАЛЕЛЬНІЙ РОБОТІ ВІТРОЕЛЕКТРИЧНИХ УСТАНОВОК

С. П. Денисюк

Доктор технічних наук, професор*

E-mail: spdens@ukr.net

Д. С. Горенко

Аспірант*

E-mail: gorenko.darya@yandex.ru

*Кафедра електропостачання

Інститут енергозбереження та енергоменеджменту

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут»

пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056

1. Вступ

В світовій енергетиці спостерігається зростання кількості електростанцій та автономних систем електроживлення з використанням нетрадиційних джерел електроенергії (НДЕ). Це, в першу чергу, стосується вітрових, сонячних, малих гідроелектростанцій і т. п. [1–3]. При роботі будь-яких електростанцій виникає необхідність підвищення надійності та стійкості їх роботи, зменшення втрат електроенергії при передачі, розуцільнення графіків навантаження, забезпечення ефективної роботи на енергоринку. Проблеми нестабільності роботи НДЕ, що зазвичай викликані їх нерівномірністю природними чинниками (нестабільність вітру, нічний час, засуха і т. п.), вирішують за допомогою використання гібридних джерел електроживлення – віртуальних електростанцій (VPP) (табл. 1).

Але при вирішенні проблеми стабільності ресурса забезпечення виникає нова, більш глобальна проблема – електромагнітна сумісність (ЕМС) різнотипних електрогенеруючих установок.

Проблема ЕМС в даний час відноситься до числа найважливіших в електроенергетиці, як в теоретичному, так і в прикладному плані. Значимість цієї проблеми настільки ж велика, як і відомі проблеми

екології, енергетичної безпеки та енергоресурсозбереження. Її економічний характер свідчить про величезні збитки, які виникають в результаті недотримання вимог ЕМС. Так, щорічний економічний збиток, зумовлений незадовільним рівнем ЕМС в промисловості і в побуті становить (за різними оцінками) від 100 до 500 млрд. євро в країнах СНД [5].

ЕМС технічних засобів розглядає пристрої і процеси, що зазвичай розглядаються з точки зору генерування електромагнітних завад, їх впливу на електрообладнання, ступінь автоматизації і корекції негативного впливу навколишнього середовища. Електромагнітна сумісність є глобальною проблемою, в рамках якої розглядається ряд окремих проблем [5]. В умовах експлуатації різних систем (наприклад, підстанцій) і підсистем (наприклад, трансформаторів) вказані проблеми можуть переплітатися і частково дублювати один одного. При цьому аналіз паралельної роботи вітроенергетичних установок (ВЕУ) в складі VPP є актуальною проблемою та вимагає укрупненого аналізу. При цьому аналіз повинен бути укрупненим та адекватним. А із-за мінливого характеру роботи ВЕУ використовувати інтегральні характеристики є неефективним. Тому актуально використовувати миттєві характеристики для аналізу паралельної роботи ВЕУ.

Таблиця 1

Варіанти поєднання гібридних електрогенеруючих вузлів

№	Вітрові електростанції	Сонячні електростанції	Біо-електростанції	Малі гідро-електростанції	Малі гідро-акумуляуючі електростанції
1	+	+	–	–	–
2	+	–	–	+	–
3	–	+	–	+	–
4	+	+	–	+	–
5	+	–	–	+	+
6	–	+	–	+	+
7	+	+	–	+	+
8	+	+	+	–	–
9	+	+	+	+	–
10	+	+	+	+	+

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Сучасний розвиток розосереджених електроенергетичних систем, зокрема і на основі ВЕУ, базується на основі положень концепції Smart Grid [2, 3]. На початку XXI ст. технології Smart Grid розглядаються як основа модернізації та інноваційного розвитку централізованих та децентралізованих систем електроенергетики.

Посилення інтересу до розгляду питань, пов'язаних з несинусоїдальними режимами, зумовлено збільшенням частки вищих гармонійних складових в токах нелінійних навантажень [4, 5]. Збільшення числа і рівня вищих гармонійних складових струмів і напруг пов'язано з широким розповсюдженням систем розосередженої генерації, електротехнічних і електромеханічних пристроїв, що є джерелами гармонік: ВЕУ, статичних перетворювачів, електродугових печей, зварювальних апаратів, регульованого приводу електромеханізмів, пристроїв з насичуються магнітними елементами і т. д. Як наслідок – зростають втрати в лініях електропередач, збільшуються перешкоди в електрообладнанні, погіршується електромагнітна обстановка і якість електроенергії [5–7].

Проблема підвищення енергоефективності в системах з ВЕУ, яка є ключовою при розв'язанні питань розвитку електроенергетики, безпосередньо пов'язана з оцінкою якості електроенергії, забезпечення заданих рівнів електромагнітної сумісності (ЕМС) [7–9].

Для оцінки енергетичної ефективності енергетичних процесів широко використовується реактивна потужність та показники на її основі [3, 10–12]. Однак поширення математичних методів і трактовок потужності, розроблених для синусоїдальних процесів, на несинусоїдальні та несиметричні багатofазні процеси, як правило, приводить до втрати зв'язку з фізичною суттю процесів в системі і до труднощів при інтерпретації результатів [3, 11–13], а інколи навіть і до помилкових висновків.

Відомі визначення реактивної потужності при несинусоїдальних струмах і напругах часто суперечать один одному, а їх використання диктується вирішенням будь-якого вузького кола завдань. При цьому для кожного кола завдань часто пропонується своє розуміння цих процесів, своя термінологія і своя декомпозиція параметрів, що описують ці процеси [3, 11, 14].

Також труднощі виникають при створенні системи оцінки енергетичної ефективності на основі відомих методів. Критерії ефективності процесів, отримані відомими класичними методами розрахунку на базі гармонійного аналізу не завжди відображають суть процесів [3, 10, 12–16]. Наприклад, всі способи еквівалентування є тільки розрахунковими прийомами і не відображають реальні фізичні процеси. Тому в несинусоїдальних несиметричних системах енергетичні процеси доцільно оцінювати по кривій миттєвої потужності, що дає можливість визначити складові потоків енергії і їх співвідношення при довільній формі кривої напруги та струму.

Для оцінки ефективності енергозберігаючих заходів, забезпечення якості постачання енергоресурсів та ЕМС з врахуванням якості електроенергії і концентрації її в енергопоточі виникають задачі адекватного підведення балансу складових енергії [3, 11, 12]. При цьому баланс енергії доцільно розглядати не тільки як вираз кількісного співвідношення між витратами та використанням енергії, тобто відображення принципів рівноваги та урівноваження, але й враховувати більш широке визначення поняття балансу – побудова системи показників, які характеризують співвідношення рівноваги в будь-якому явищі, що змінюється [3, 11].

У теперішній час в рамках розвитку теорії обмінних процесів в електроенергетичних системах успішно вирішуються окремі завдання. Зокрема, при аналізі процесів перетворення енергії в електромеханічних системах [12, 13], аналізі якості електроенергії в системах електричної тяги [16], векторному керуванні електричними машинами змінного струму [10], створенні обладнання для електроприводів великої потужності з покращеними показниками за рахунок використання компенсуючих можливостей, коли додатково вводяться модулі з властивостями генерування реактивної потужності, компенсації вищих гармонійних шляхом генерування гармонійних зворотної полярності [15]. Необхідно відзначити окремі дослідження з оптимізації рівнів реактивної потужності в системах електропостачання з джерелами розосередженої генерації [8, 17].

У січні 2000 року IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers – Інститут інженерів з електротехніки та електроніки) оголосив про створення стандарту IEEE 1459-2000 для обчислення повної потужності трифазних електричних мереж з несиметричною нелінійним навантаженням, в умовах балансу і дисбалансу. В березні 2010 року був опублікований стандарт IEEE 1459-2010 з важливими змінами та поправками [18]. У стандарті IEEE 1459-2010 для реалізації алгоритму визначення складових потужності покладена вимога передачі максимальної потужності від джерела споживачеві, а саме – прямої послідовності основної гармоніки [19].

На сьогодні не виникає сумніву, що проблема ефективного електропостачання безпосередньо пов'язана з оцінкою якості та балансу електроенергії в пристроях і системах та невід'ємна від аналізу складових повної

потужності їх електричних ланцюгів і, перш за все, від визначення неактивної потужності.

Проведений аналіз показав, що важливим є вирішення багатьох проблем, таких як у першу чергу проектування та побудови систем з розосередженими джерелами генерації, підвищення їхньої енергоефективності, покращення якості електроенергії, забезпечення заданих рівнів ЕМС, моніторингу стану елементів системи, ведення режимів електропостачання. Вирішення цих проблем ґрунтується на побудові адекватних моделей, проведення комплексного аналізу енергетичних процесів.

Це обумовлює необхідність комплексного розгляду задач оцінки обмінних процесів, складових втрат електроенергії, адекватності формування та розрахунку складових балансу (як миттєвого, так і інтегрального).

Також у дослідженнях необхідно враховувати, що при переході до ринкової системи взаємовідносин поняття «електрична енергія» з чисто науково-технічної сфери переходить в економічну, стаючи об'єктом купівлі-продажу. Дана обставина накладає додаткові вимоги до електроенергії як до товару, зокрема забезпечення відповідності з діючими нормативами, порушення яких тягне за собою не тільки технічні проблеми, але і штрафні економічні санкції.

Як наслідок, перспективним є пошук нових підходів до забезпечення якості електричної енергії в системах з генераторами електроенергії на основі обмінних процесів, а в більш широкому контексті – якості електропостачання в системах з джерелами розосередженої генерації. У першу чергу важливо проаналізувати обмінні процеси при сумісній (паралельній) роботі таких складних джерел як БЕУ, що можуть працювати у складі вітроенергетичних станцій (ферм), віртуальних електростанцій та активних споживачів (prosumer).

3. Ціль та задачі дослідження

Метою даного дослідження є аналіз обмінних процесів в системах з урахуванням зовнішніх кондуктивних завад.

Для досягнення поставленої мети були виділені наступні задачі:

- провести розрахунок для аналізу впливу навантаження на обмінні процеси в системі «два генератори – одне навантаження»;
- провести розрахунок та аналіз для виявлення збіжностей в характеристиках обмінних процесів;
- виявити можливості мінімізації обмінної потужності при оптимізації режимів роботи систем електроживлення.

4. Матеріали та методи дослідження електромагнітної сумісності нетрадиційних джерел електроенергії

Концепція К. Будяну основана на частотному представленні струмів та напруг, з якої активна та повна потужність визначається [20]:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \sum_{k=1}^n U_k I_k \cos(\beta_1 + \alpha_k), \quad (1)$$

$$S = UI = \sqrt{\sum_{k \in N} U_k^2} \sqrt{\sum_{l \in M} I_l^2}, \quad (2)$$

а також вводилась складова повної потужності – реактивна потужність:

$$Q = \sum_{k=1}^n U_k I_k \sin(\beta_1 + \alpha_k). \quad (3)$$

Визначення реактивної потужності за формулою (3) не забезпечує рівність, що викликало необхідність введення додаткової складової – потужності спотворення, яка визначається як нев'язка між квадратом повної і сумою квадратів активної та реактивної потужностей:

$$D = \sqrt{S^2 - (P^2 + Q^2)}. \quad (4)$$

Аналогічно С. Фризе було запропоновано виконувати розкладання струму та напруги на дві складові, а квадрат повної потужності представляти сумою квадратів активної (ефективної) та пасивної (фіктивної) потужностей:

$$Q_F = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{D^2 + Q^2}. \quad (5)$$

Також для систем з не синусоїдальними сигналами використовують реактивну потужність Кваде (6), що являється нев'язкою між неактивною потужністю Фризе та першою гармонічною складовою реактивної потужності:

$$Q_{\text{кв}} = \sqrt{Q_F^2 - Q_1^2}. \quad (6)$$

Як видно з табл. 2 [4], класичний підхід лише фіксує наявність реактивної потужності при наявності реактивного струму (пункти 3 та 11–13 табл. 2). Проте, класичний підхід не дозволяє аналізувати обмінні процеси в різних перетинах кола при різних режимах роботи між різнотипними генераторами та здійснювати їх оцінку при дії різнойменних гармонічних складових струму та напруги.

Прикладом реактивної потужності, визначеної за допомогою обмінних процесів, є реактивна потужність на основі визначення обмінної потужності $Q_{\text{об}}$ (7) за умови постійної інтенсивності перетворення електроенергії в інші види протягом періоду T.

$$Q_{\text{об}} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) i_p(t) dt, \quad (7)$$

де $i_p(t) = i(t) - i_a(t)$ – реактивна складова струму; $i_a(t) = u(t)P/U_d^2$ – активна складова струму; $i(t)$ – повний струм в ланцюзі; P – активна потужність; U_d – діюче значення напруги.

Для проведення аналізу взаємного впливу елементів в системі два генератори – одне навантаження, схема якої зображена на рис. 1, та визначення параметрів, які здійснюють найсуттєвіший вплив, задамося початковими параметрами.

Задамо, що параметри генераторів:

$$e_1(t) = E_{1,0} + \sum_{k=1}^n E_{1k} \sin(k\omega t + \varphi_{1k}),$$

$$e_2(t) = E_{2,0} + \sum_{k=1}^n E_{2k} \sin(k\omega t + \varphi_{2k})$$

несинусоїдальні різнотипні ЕРС генераторів та r_1 , r_2 – внутрішні опори генераторів. Також задамося активно-індуктивним навантаженням $Z_H = R + X_L$. Схема заміщення системи, що описується, зображена на рис. 2.

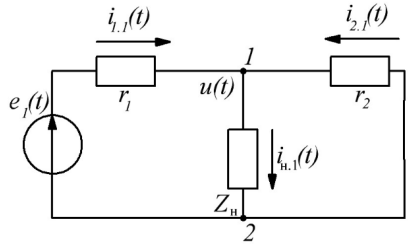
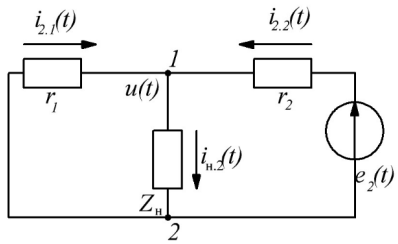
Таблиця 2

Співвідношення здатності відображення різних сторін енергетичних процесів за допомогою реактивних та обмінних потужностей

Характеристика різних аспектів протікання енергетичного процесу	Реактивна потужність	Обмінна потужність
1. Однозначне відображення обмінних процесів (індикація умови $W \neq 0$)	–	+
2. Накопичення енергії в реактивних елементах (характеристика енергоємності та екстремальних режимів роботи реактивних елементів)	–	+
3. Наявність взаємокомпенсації реактивних потужностей різних гармонік (можливість існування умови рівності нулю реактивної характеристики при $i_p(t) \neq 0$)	+	–
4. Відображення енергообміну при наявності різноименних гармонік струму та напруги в перетині кола	–	+
5. Відображення обмінних процесів між генераторами струму та напруги	–	+
6. Оцінка обмінних процесів у перехідних режимах	–	+
7. Співставлення обмінних процесів у різних перетинах кола	–	+
8. Оцінка взаємного впливу елементів кола, які характеризуються різним гармонічним складом напруги $u(t)$ та струму $i(t)$	–	+
9. Оцінка стійкості режимів роботи за рахунок введення граничних значень величини характеристик	–	+
10. Врахування значень кутів струму ψ_k^i та напруги ψ_k^u ($k > 1$) для вищих гармонік	–	+
11. Індикація наявності реактивної потужності у колі з нелінійним нестационарним опором при відсутності реактивних елементів	+	–
12. Відображення генерації реактивної потужності в колах з ключовими елементами	+	–
13. Відображення гармонічних $p_r(t)$ та між гармонічних $p_{mr}(t)$ складових миттєвої потужності $p(t)$	+	–
14. Однозначне усунення зворотних потоків енергії при компенсації відповідної характеристики	–	+

Таблиця 3

Розподіл струмів в схемі заміщення

Схема заміщення при дії одного генератора		
Струм, що протікає через опір r_1	$i_{1,1}(t) = \frac{e_1(t)}{\frac{Z_i \cdot r_2}{Z_i + r_2} + r_1}$	$i_{1,2}(t) = i_{2,2}(t) \frac{Z_i}{Z_i + r_1}$
Струм, що протікає через опір r_2	$i_{2,1}(t) = i_{1,1}(t) \frac{Z_i}{Z_i + r_2}$	$i_{2,2}(t) = \frac{e_2(t)}{\frac{Z_i \cdot r_1}{Z_i + r_1} + r_2}$
Струм, що протікає через навантаження	$i_{H,1}(t) = i_{1,1}(t) \frac{r_2}{Z_i + r_2}$	$i_{H,2}(t) = i_{2,2}(t) \frac{r_1}{Z_i + r_1}$
Загальна схема заміщення системи два генератори-навантаження		
Струм, що протікає через опір r_1	$i_1(t) = i_{1,1}(t) - i_{1,2}(t) = I_{1,0} + \sum_{k=1}^n I_{m1k} \sin(k\omega t + \psi_{1k})$	
Струм, що протікає через опір r_2	$i_2(t) = i_{2,2}(t) - i_{2,1}(t) = I_{2,0} + \sum_{k=1}^n I_{m2k} \sin(k\omega t + \psi_{2k})$	
Струм, що протікає через навантаження	$i_i(t) = i_{H,1}(t) + i_{H,2}(t) = I_{i,0} + \sum_{k=1}^n I_{mi k} \sin(k\omega t + \psi_{ik})$	

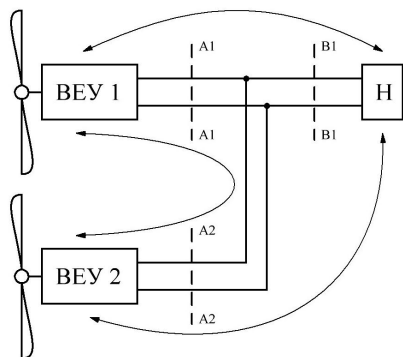


Рис. 1. Схема живлення одного навантаження двома вітрогенераторами

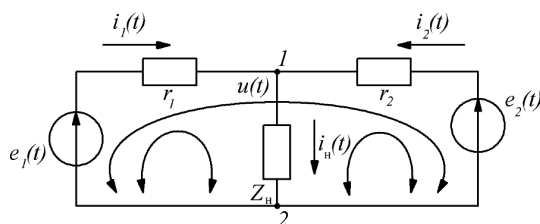


Рис. 2. Схема заміщення системи два генератори, що живлять одне навантаження

Для визначення струмів, що протікатимуть через кожний генератор та через навантаження, можна використати будь-який з відомих з теоретичних основ електротехніки метод розрахунку (метод контурних струмів, вузлових потенціалів, накладання тощо) [20]. Для схеми заміщення, зображеної на рис. 2, найпростіше використати метод накладання. Для цього умовно розглянемо вплив кожного генератора на навантаження (табл. 3). Для кожної схеми визначаються долі впливу кожного генератора в ланцюзі живлення за законом Ома і в навантаженні методом чужого опору.

Розглядаємо енергетичні потоки через переріз A1-A1 – потоки енергії, що протікають через перший генератор, A2-A2 – потоки енергії, що протікають через другий генератор, B1-B1 – потоки енергії, що накопичуються та віддаються навантаженням.

Напруга між вузлами 1-2 схеми заміщення:

$$u(t) = e_1(t) - i_1(t) \cdot r_1 = e_2(t) - i_2(t) \cdot r_2,$$

або, можна записати в загальному вигляді (8):

$$u(t) = U_0 + \sum_{k=1}^n U_{mk} \sin(k\omega t + \varphi_{uk}). \quad (8)$$

Отже обмінна потужність через перетини A1-A1, A2-A2 та B1-B1 згідно формули (7) матиме вигляд:

$$Q_{об.1} = \frac{1}{T} \int_0^{t^+} u(t) i_{1p}(t) dt, \quad (9)$$

$$Q_{об.2} = \frac{1}{T} \int_0^{t^+} u(t) i_{2p}(t) dt, \quad (10)$$

$$Q_{об.н} = \frac{1}{T} \int_0^{t^+} u(t) i_{ln}(t) dt. \quad (11)$$

З формул (9)–(11) випливає, що через кожний перетин за період часу протікатиме різне значення обмінної потужності $Q_{об.1} \neq Q_{об.2} \neq Q_{об.н}$.

5. Результати досліджень обмінних процесів в системах з різнотипними джерелами електроенергії

Напруга, що буде створюватиметься в перерізі A–A (рис. 3) змінюється періодично за синусоїдальним законом, який можна записати у вигляді: $u(t) = 1000 \sin(\omega t)$ тоді як закон зміни струму, що генерується джерелом перешкод $J(t)$, може змінюватись випадково. Зупинимось на трьох варіантах періодичних функцій зміни струму, таких як [4, 20]:

– прямокутного періодичного сигналу:

$$i(t) = \frac{4 \cdot I_m}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin(2k-1)(\omega t + \varphi)}{2k-1}, \quad (12)$$

– трикутного періодичного сигналу:

$$i(t) = \frac{8 \cdot I_m}{\pi^2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^{k+1} \sin(2k-1)(\omega t + \varphi)}{(2k-1)^2}, \quad (13)$$

– синусоїдального періодичного сигналу:

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi). \quad (14)$$

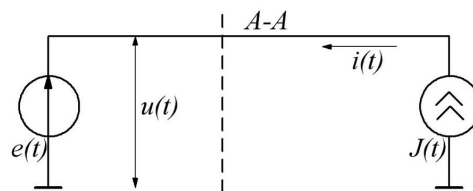


Рис. 3. Основні напрямки потоків енергії через перерізи кола

Оскільки ймовірність рівності нулю зсуву фаз між напругою та струмом в перетині дослідження майже нульова, виникає необхідність визначення обмінної потужності в залежності від зсуву фаз при різній формі дії сигналу. Для прикладу представлено розрахунок обмінної потужності при дії третьої гармоніки прямокутної форми сигналу при зсуві фаз між напругою та струмом $\varphi = \pi/2$ (рис. 4), для якого:

$$u(t) = 1000 \sin(\omega t),$$

$$i(t) = \frac{4 \cdot 10}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin(2k-1)(3\omega t + \varphi)}{2k-1},$$

$$Q_{об} = \frac{2}{T} \int_0^{t^+} u(t) i_p(t) dt,$$

$$Q_{об} = \frac{2}{T} \left(\int_0^{T/12} u(t) i_p(t) dt + \int_{T/4}^{5T/12} u(t) i_p(t) dt \right) = 3,138 \text{ кВар.}$$

З рис. 4 видно, як для різних гармонічних складових збудовувальних струмів змінюється обмінна потужність. При дії гармонік 5, 7 та 9 обмінна потужність майже не змінюється, що викликає необхідність їх компенсації, тому що при будь-якому режимі роботи такої системи

будуть присутні обмінні процеси. При дії третьої гармонічної складової з'являється точка, при зсуві фаз рівному $-\pi$ коли обмінна потужність рівна нулю. При дії ж першої гармонічної складової збурювального сигналу з графіку видно, що на діапазоні кута зсуву фаз $-\pi < \varphi < -1$ генератор виступатиме в ролі споживача, це впливає з від'ємного знаку обмінної потужності, а при інших значеннях кута він виступатиме в ролі генератора. Також з графіку випливають дві точки, що характеризуватимуть оптимальний режим роботи (точки $\varphi = -1$ та $\varphi = \pi$).

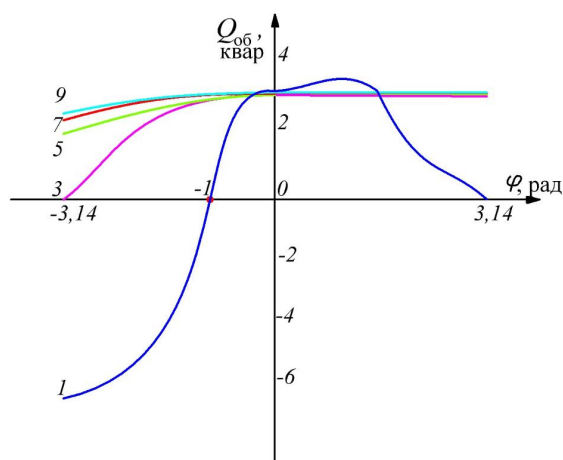


Рис. 4. Залежність обмінної потужності від кута зсуву фаз при дії основної та вищих гармонічних складових струму: — основна гармоніка; — третя гармоніка; — п'ята гармоніка; — сьома гармоніка; — дев'ята гармоніка

6. Обговорення результатів дослідження обмінних процесів в колах з нетрадиційними джерелами електроенергії

За результатами розрахунків побудовано графіки (рис. 5), з яких випливають точки рівності нулю обмінної потужності, тобто значення кута зсуву фаз, при якому обмінна потужність за основною та вищими гармоніками рівна нулю. Також ці розрахунки дозволили провести дослідження впливу одиничного періодичного імпульсного сигналу з різною частотою та різної тривалості та визначити оптимальні точки. Залежність кута зсуву фаз від тривалості імпульсу при $Q_{об} \rightarrow \min$ представлено на рис. 6, з якого видно, що для кожного значення кута зсуву фаз існує множина з двох значень оптимального кута і ця залежність є прямолінійною.

Як видно з рис. 4–6, графічні залежності обмінної потужності від кута зсуву фаз мають однотипний характер. Для першої гармонічної складової збурювальної дії одна точка для всіх типів періодичного сигналу є спільною – $\varphi = \pi$ а інша нульова точка коливається в межах від $\varphi = -1,26$ при трикутному періодичному імпульсному сигналі до $\varphi = -1$ при прямокутному періодичному імпульсному сигналі.

Отримані дані дали змогу провести аналіз рівномірних періодичних різних за формою збурювальних сигналів та надали базу для проведення аналізу періодичних нерівномірних імпульсних збурювальних сигналів на генератор. На рис. 7, 8 представлені графічні залежності обмінної потужності від кута зсуву фаз при дії різних за тривалістю імпульсних сигналів збурень.

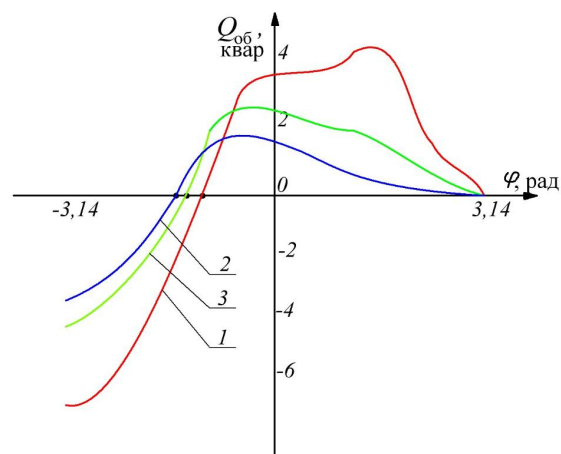


Рис. 5. Залежність обмінної потужності від кута зсуву фаз при дії основної гармонічної складової джерела перешкод: 1 — прямокутний імпульсний сигнал; 2 — трикутний імпульсний сигнал; 3 — синусоїдальний сигнал

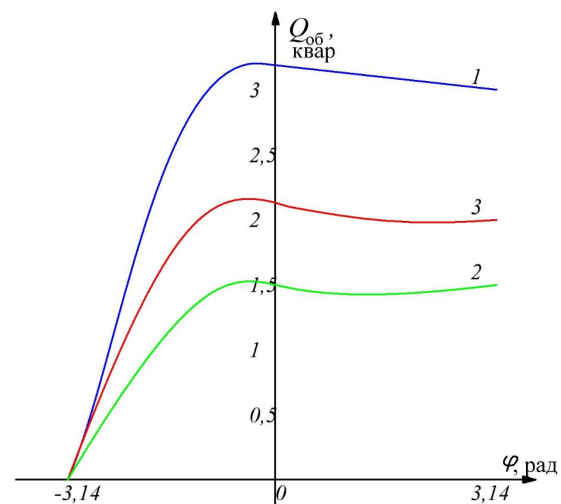


Рис. 6. Залежність обмінної потужності від кута зсуву фаз при дії третьої гармонічної складової джерела перешкод: 1 — прямокутний імпульсний сигнал; 2 — трикутний імпульсний сигнал; 3 — синусоїдальний сигнал

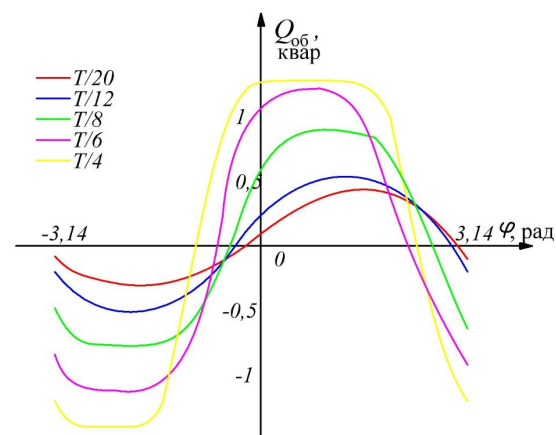


Рис. 7. Залежність обмінної потужності від кута зсуву фаз $Q_{об} = f(\varphi)$ при різній тривалості імпульсу: — $\tau = T/20$; — $\tau = T/12$; — $\tau = T/8$; — $\tau = T/6$; — $\tau = T/4$

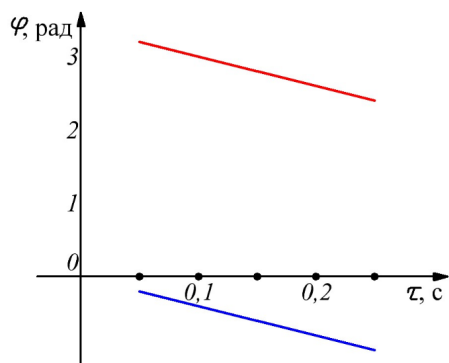


Рис. 8. Кутова характеристика мінімуму обмінної потужності: — перша множина оптимальних значень; — друга множина оптимальних значень

При аналізі графіків, зображених на рис. 7, можна побачити, що точки рівності нулю обмінної потужності при різних кутах зсуву фаз та тривалості імпульсу мають деяку залежність. Побудувавши дані залежності на рис. 8, виявилось, що вони лінійні та паралельні. За допомогою даної характеристики можна визначати оптимальний режим роботи конкретного генератора, знаючи характер збурювальної дії та тривалість імпульсів.

7. Висновки

1. При суто активному навантаженні вся потужність, що генерується генераторами, споживається

активним навантаженням, а перетоки між генераторами взаємокомпенсуються. При появі реактивного опору в навантаженні виникають перетоки потужності. Несинусоїдальність напруги, що генерується одним і/або двома генераторами, також викликає взаємообмін електромагнітною енергією між елементами кола.

2. З розрахунків співставлення графіків з різнотипним збурювальним сигналом виявилось, що незалежно від того, які сигнали співставлялися, залежності обмінної потужності від кута зсуву фаз є корельованими, тобто для спрощення розрахунків можна виконувати заміну синусоїдального сигналу перешкоди на прямокутний або трикутний сигнали з однаковими амплітудами та частотами. Також, як видно з рисунків для вищих та основної гармонічних складових струмів, обмінна потужність зростає і досягає певного пікового значення, після чого при дії вищих гармонік обмінна потужність не змінюється або змінюється несуттєво, а при дії основної гармоніки продовжує зростати до свого максимуму, після чого збігається в нуль. Така тенденція спостерігається для всіх періодичних різних за формою сигналів похибки.

3. Поведені дослідження дозволяють проводити аналіз та оптимізацію енергопроцесів в розосереджених електроенергетичних систем з різними джерелами енергії, виявити та мінімізувати небажані потоки енергії між елементами системи, а також компенсувати взаємний вплив різнотипних джерел електроенергії, як традиційних так і нетрадиційних.

Література

1. Артюх, С. Ф. Предпосылки к созданию энергогенерирующих узлов гибридного типа на базе возобновляемых источников энергии [Текст] / С. Ф. Артюх, К. В. Махотило, К. В. Сапельников // Наукові праці ДонНТУ. – 2015. – № 1. – С. 13–17.
2. Smart Grids Strategic Research Agenda (SRA) for RD&D1 needs towards 2035 "SmartGrids SRA 2035" [Text]. – European Technology Platform SmartGrids, 2012. – 74 p. – Available at: <http://www.smartgrids.eu/documents/sra2035.pdf>
3. Brown, E. State of the States 2008: Renewable Energy Development and the Role of Policy [Text] / E. Brown, S. Busche // Technical Report NREL/TP. – 2008. – P. 16–35. doi: 10.2172/1219298
4. Жуйков, В. Я. Энергетичні процеси в електричних колах з ключовими елементами [Текст] / В. Я. Жуйков, С. П. Денисюк. – К.: НТУУ «КПІ», 2010. – 264 с.
5. Жежеленко, И. В. Электромагнитная совместимость потребителей [Текст]: монография / И. В. Жежеленко, А. К. Шидловский, Г. Г. Пивняк и др. – М.: Машиностроение, 2012. – 351 с.
6. Кириленко, О. В. Особливості забезпечення електромагнітної сумісності в електричних мережах України [Текст]: зб. наук. праць / О. В. Кириленко, С. П. Денисюк, О. Б. Рибіна // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України. – 2007. – № 1 (16). – С. 27–30.
7. Ramie, J. Smart grid EMC standards harmonization [Text] / J. Ramie // IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine. – 2013. – Vol. 2, Issue 4. – P. 79–82. doi: 10.1109/memc.2013.6714704
8. Oliveira, P. M. D. Reactive Power Response of Wind Generators Under an Incremental Network-Loss Allocation Approach [Text] / P. M. D. Oliveira, P. M. Jesus, E. D. Castronuovo, M. T. Leao // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2008. – Vol. 23, Issue 2. – P. 612–621. doi: 10.1109/tec.2007.914172
9. Verma, S. P. Smart Grid, Its Power Quality and Electromagnetic Compatibility [Text] / S. P. Verma, P. Kumar, N. Islam // MIT International Journal of Electrical and Instrumentation Engineering. – 2012. – Vol. 2, Issue 1. – P. 55–64.
10. Akagi, H. Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning [Text] / H. Akagi, E. H. Watanabe, M. Aredes. – New York: Wiley, 2007. – 380 p. doi: 10.1002/0470118938
11. Czarnecki, L. S. Instantaneous Reactive Power p-q Theory and Power Properties of Three-Phase Systems [Text] / L. S. Czarnecki // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2006. – Vol. 21, Issue 1. – P. 362–367. doi: 10.1109/tpwrd.2005.852348
12. Загирняк, М. В. Анализ процессов преобразования энергии в электромеханическом комплексе [Текст] / М. В. Загирняк, Д. И. Родькин // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2012. – Вип. 3. – С. 30–36.

13. Загірняк, М. В. Направлення розвитку теорії миттєвості потужності та її застосування в задачах електромеханіки [Текст] / М. В. Загірняк, Д. І. Родькин, А. П. Черний, Т. В. Коренькова // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2011. – № 3. – С. 347–354.
14. Денисюк, С. П. Аналіз взаємного впливу елементів системи електроживлення з перетворювачами [Текст] / С. П. Денисюк // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України. – 2007. – № 2. – С. 13–17.
15. Костин, Н. А. Методи визначення складових потужності в системах електричної тяги [Текст] / Н. А. Костин, А. В. Петров // Технічна електродинаміка. – 2011. – № 3. – С. 53–59.
16. Жемеров, Г. Г. Система складових повної потужності та енергетичних коефіцієнтів на основі р-q-г теорії потужності [Текст] / Г. Г. Жемеров, Д. С. Крылов, Д. В. Тугай // Технічна електродинаміка, тематичний випуск. Проблеми сучасної електротехніки. – 2004. – № 1. – С. 69–74.
17. Xu, L. Direct Active and Reactive Power Control of DFIG for Wind Energy Generation [Text] / L. Xu, P. Cartwright // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2006. – Vol. 21, Issue 3. – P. 750–758. doi: 10.1109/tec.2006.875472
18. IEEE Standard Definition for the measurement of Electric Power Quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced or unbalanced conditions (IEEE std. 1459TM – 2010) [Text]. – IEEE Power and Energy Society, New York, 2010.
19. Willems, J. L. The Apparent Power Concept and the IEEE standard 1459–2000 [Text] / J. L. Willems, J. A. Ghijselen, A. E. Emanuel // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2005. – Vol. 20, Issue 2. – P. 876–884. doi: 10.1109/tpwr.2005.844267
20. Жемеров, Г. Г. Теорія потужності Фрізе та сучасні теорії потужності [Текст] / Г. Г. Жемеров, О. В. Ильина // Електротехніка і Електромеханіка. – 2007. – № 6. – С. 63–65.